

*Запропоновано метод контролю динаміки руху подовженого контейнера з двома або декількома синхронно працюючими віброзбудниками, що дозволяє вимірювати вертикальне і горизонтальне переміщення контейнера, амплітуду, частоту і прискорення руху контейнера*

*Ключові слова: контейнер, контроль, датчики, вихідний сигнал, магніт, модулятор*

*Предложен метод контроля динамики движения удлиненного контейнера с двумя или несколькими синхронно работающими вибровозбудителями, позволяющий измерять вертикальное и горизонтальное перемещения контейнера, амплитуду, частоту и ускорение движения контейнера*

*Ключевые слова: контейнер, контроль, датчики, выходной сигнал, магнит, модулятор*

*The method of control of motion dynamics of the extended container with two or by a few synchronously workings vibroexciters is offered, allowing to measure the vertical and horizontal moving of container, amplitude, frequency and acceleration of motion of container*

*Keywords: container, control, sensors, output signal, magnet, keyer*

УДК 621.9.048

# КОНТРОЛЬ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ УДЛИНЕННОГО КОНТЕЙНЕРА

**М.А. Калмыков**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра «Компьютерные системы и сети»\*

**А.В. Романченко**

Аспирант\*  
Кафедра «Технология машиностроения»\*  
Контактный тел.: 099-038-24-79, (0642) 55-25-08  
E-mail: romanchenkoav@mail.ru

**В.В. Яковенко**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
Кафедра «Электромеханика»\*  
\*Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля  
кв. Молодежный, 20А; г. Луганск, Украина, 91034

## 1. Введение

Известно, что для вибрационной обработки длиномерных деталей оптимальным решением является применение удлиненного контейнера. Для достижения максимальной производительности вибрационной обработки рационально применение удлиненных контейнеров с несколькими синхронно работающими вибровозбудителями.

## 2. Постановка проблемы

Поскольку удлиненный контейнер имеет два или несколько синхронно работающих вибровозбудителей, то при нарушении их синхронизации движения контейнера будут неодинаковы по его длине и соответственно нарушится процесс вибрационной обработки. Поэтому необходим контроль динамики движения отдельных частей контейнера по его длине. Кроме того система контроля должна давать информацию об амплитуде и частоте колебаний контейнера, а также следить за состоянием подшипниковых узлов.

## 3. Принцип построения системы контроля

Основой системы контроля является измерительное устройство, которое состоит из группы датчиков и устройства обработки сигналов, поступающих от датчиков. Датчики различаются по виду измеряемой величины, по частотной характеристике, по чувствительности, по порогу чувствительности, по удобству монтажа. Удобство установки играет для оценки качества датчиков немаловажную роль. Чем проще установка датчика, тем шире возможности к его применению.

Оптимальным условием измерительного канала является измерение большего числа параметров динамики движения контейнера минимальным количеством измерительных устройств. Так, например, измерение таких параметров как частота колебаний контейнера, амплитуда колебаний, перемещения, виброускорения возможно при помощи датчиков перемещения контейнера, установленные на его стенках. При этом непосредственно измеряется только перемещение, а амплитуда, частота и ускорение получаются после обработки полученной первичной информации.

Пять параметров движения контейнера могут быть измерены с помощью одного вида датчиков, которые функционируют на принципе измерения постоянного магнитного поля магнитомодуляционными измерительными преобразователями. В качестве источника постоянного магнитного поля используются постоянные магниты.

Такой принцип построения датчиков обеспечивает высокую временную и температурную стабильность, надежность, высокую чувствительность, простоту монтажа, помехоустойчивость и сравнительно низкую стоимость.

Основой датчика служит постоянный магнит последнего поколения [1] WdFeB, над которым перемещается датчик магнитного поля.

#### 4. Функция преобразования датчика перемещения контейнера

Конструкция датчика перемещения корпуса контейнера показана на рис. 1. Источником постоянного магнитного поля является магнит 2, закрепленный на немагнитной прокладке 3. Датчик имеет П-образный магнитопровод 4, который имеет воздушный промежуток, в котором размещен модулятор 5.

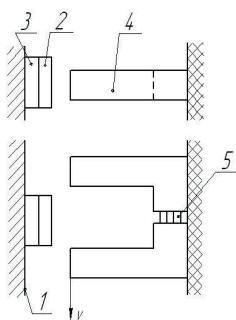


Рис. 1. Конструкция датчика перемещения корпуса контейнера вибрационного станка: 1 – корпус контейнера; 2 – постоянный магнит; 3 – немагнитная прокладка; 4 – магнитопровод; 5 - модулятор

При перемещении датчика относительно постоянного магнита в сердечнике изменяется магнитный поток, который измеряется с помощью модулятора. Характер изменения иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 2. Между точками а и в существует линейный участок.

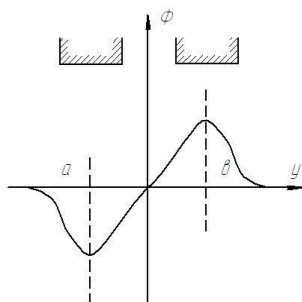


Рис. 2. Зависимость магнитного потока в сердечнике от перемещения датчика относительно магнита по координату y

Для расчета характеристики датчика, показанной на рис. 2, составляется упрощенная модель магнитопровода, показанная на рис. 3. Поле П-образного сердечника аппроксимируется полем двух площадок размерами  $2a \times 2b$ , размещенных на расстоянии  $2t$  и имеющих нормальную составляющую намагниченности на поверхности полюсов  $M_n$ . Площадки помещены в систему координат  $u, v, w$  и находятся на расстоянии  $h$  от поверхности постоянного магнита.

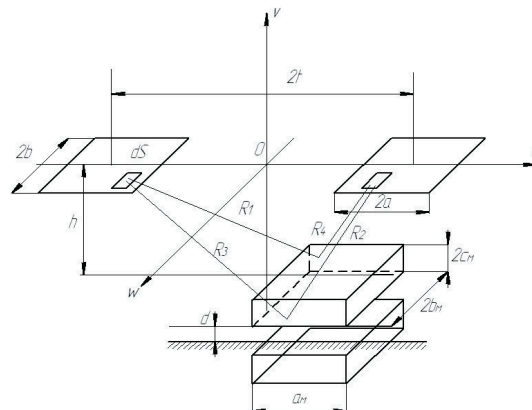


Рис. 3. Упрощенная электрическая модель магнитной системы датчика

Магнитный поток в П-образном сердечнике определяется с помощью теоремы о взаимности [1], которая после преобразования выражается следующей аналитической зависимостью:

$$\Phi = \frac{\mu_0}{iw} \oint_S \varphi_m M'_n dS, \quad (1)$$

где  $\varphi_m$  – магнитный потенциал, создаваемый обмоткой с током, расположенной на П-образном сердечнике, создающей МДС, равную  $iw$ ;

$M'_n$  – нормальная составляющая намагниченности на активных плоскостях постоянного магнита.

Потенциал, создаваемый П-образным сердечником с обмоткой  $iw$  на поверхностях постоянного магнита равен

$$\varphi_m = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4,$$

$$\varphi_n = \varphi_5 + \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8,$$

где  $\varphi_m$  – потенциал на верхней и нижней плоскостях постоянного магнита;

$\varphi_n$  – потенциал на верхней и нижней плоскостях зеркального отображения постоянного магнита.

Магнитный потенциал на одной плоскости постоянного магнита, создаваемый магнитопроводом с расположенной на нем обмоткой с током, создающей МДС –  $iw$ , равен

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{M'_n dS}{R_1} - \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{M'_n dS}{R_2}, \quad (2)$$

$$\text{где } R_1 = \sqrt{(u - t - n')^2 + h^2 + (w - w')^2};$$

$$R_2 = \sqrt{(u + t - n')^2 + h^2 + (w - w')^2}.$$

Значения величин, входящих в (2), ясны из рис. 3.

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \frac{M'_n}{4\pi} \left[ \int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{du'dw'}{\sqrt{(u-t-n')^2 + h^2 + (w-w')^2}} - \int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{du'dw'}{\sqrt{(u+t-n')^2 + h^2 + (w-w')^2}} \right] =$$

$$= \frac{M'_n}{4\pi} \left[ \int_{-b}^b \ln \frac{u-t-a+\sqrt{(u-t-a)^2 + h^2 + (w-w')^2}}{u-t+a+\sqrt{(u-t+a)^2 + h^2 + (w-w')^2}} dw' - \int_{-b}^b \ln \frac{u+t-a+\sqrt{(u+t-a)^2 + h^2 + (w-w')^2}}{u+t+a+\sqrt{(u+t+a)^2 + h^2 + (w-w')^2}} dw' \right]. \quad (3)$$

Если применить теорему о среднем значении интервала, то (3) можно записать так

$$\varphi_1 + \varphi_2 \approx \frac{M'_n b}{2\pi} \left[ \ln \frac{u-t-a+\sqrt{(u-t-a)^2 + h^2 + (w-0,3b)^2}}{u-t+a+\sqrt{(u-t+a)^2 + h^2 + (w-0,3b)^2}} - \ln \frac{u+t-a+\sqrt{(u+t-a)^2 + h^2 + (w-0,3b)^2}}{u+t+a+\sqrt{(u+t+a)^2 + h^2 + (w-0,3b)^2}} \right]. \quad (4)$$

Потенциал на нижней плоскости магнита будет равен

$$\varphi_3 + \varphi_4 \approx \frac{M'_n b}{2\pi} \left[ \ln \frac{u-t-a+\sqrt{(u-t-a)^2 + (h+2c_z)^2 + (w-0,3b)^2}}{u-t+a+\sqrt{(u-t+a)^2 + (h+2c_z)^2 + (w-0,3b)^2}} - \ln \frac{u+t-a+\sqrt{(u+t-a)^2 + (h+2c_z)^2 + (w-0,3b)^2}}{u+t+a+\sqrt{(u+t+a)^2 + (h+2c_z)^2 + (w-0,3b)^2}} \right]. \quad (5)$$

Потенциал на верхней плоскости зеркального изображения постоянного магнита определяется следующей формулой:

$$\varphi_5 + \varphi_6 \approx \frac{M'_n b}{2\pi} \left[ \ln \frac{u-t-a+\sqrt{(u-t-a)^2 + (h+2c_z+2d)^2 + (w-0,3b)^2}}{u-t+a+\sqrt{(u-t+a)^2 + (h+2c_z+2d)^2 + (w-0,3b)^2}} - \ln \frac{u+t-a+\sqrt{(u+t-a)^2 + (h+2c_z+2d)^2 + (w-0,3b)^2}}{u+t+a+\sqrt{(u+t+a)^2 + (h+2c_z+2d)^2 + (w-0,3b)^2}} \right]. \quad (6)$$

Формула для расчета потенциала на нижней плоскости зеркального изображения постоянного магнита имеет вид

$$\varphi_7 + \varphi_8 \approx \frac{M'_n b}{2\pi} \left[ \ln \frac{u-t-a+\sqrt{(u-t-a)^2 + (h+4c_z+2d)^2 + (w-0,3b)^2}}{u-t+a+\sqrt{(u-t+a)^2 + (h+4c_z+2d)^2 + (w-0,3b)^2}} - \ln \frac{u+t-a+\sqrt{(u+t-a)^2 + (h+4c_z+2d)^2 + (w-0,3b)^2}}{u+t+a+\sqrt{(u+t+a)^2 + (h+4c_z+2d)^2 + (w-0,3b)^2}} \right]. \quad (7)$$

Зависимости (4)-(7) позволяют рассчитать значение потенциалов  $\varphi_m$  и  $\varphi_n$  и использовать их значения в (1). Согласно (1) магнитный поток в магнитопроводе датчика определяется по следующей зависимости:

$$\Phi = \frac{\mu_0 M'_n}{i w} \left[ \int_{-b_m}^{b_m} \int_{-a_m}^{a_m} \varphi_m(u-x_1 w-0,3b) M_n du dw - \int_{-b_m}^{b_m} \int_{-a_m}^{a_m} \varphi_n(u-x_1 w-0,3b) M_n du dw \right], \quad (8)$$

где  $M_n$  – нормальная составляющая намагниченности на активной плоскости постоянного магнита.

По (8) были рассчитаны зависимости магнитного потока в сердечнике магнитного датчика при его перемещении по координате  $x$  при следующих его геометрических и магнитных параметрах:  $2a_m=2 \cdot 10^{-2}$  м;  $2b_m=2 \cdot 10^{-2}$  м;  $2c_m=0,5 \cdot 10^{-2}$  м;  $M_n=8,5 \cdot 10^5$  А/м;  $h=4 \cdot 10^{-2}$  м;  $2t=5 \cdot 10^{-2}$  м;  $2a=2b=2 \cdot 10^{-2}$  м.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 4, зависимость  $\Phi(x)$  имеет линейный участок, на котором должны происходить изменения перемещения датчика относительно постоянного магнита. С увеличением расстояния от постоянного магнита до стенки контейнера магнитный поток в сердечнике датчика увеличивается.

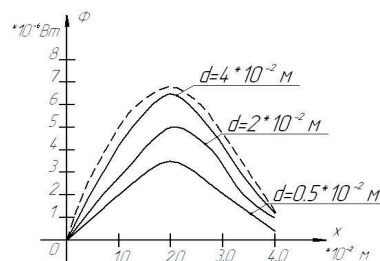


Рис. 4. Зависимость магнитного потока в сердечнике датчика от перемещения по координате  $x$  и от расстояния постоянного магнита до стенки контейнера

Если контейнер выполнен из немагнитного материала, то магнитный поток в сердечнике датчика рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi = \frac{\mu_0 M'_n}{i w} \int_{-b_m}^{b_m} \int_{-a_m}^{a_m} \varphi_m(u-x_1 w-0,3b) M_n du dw. \quad (9)$$

На рис. 4 пунктиром показана функция преобразования датчика динамики движения контейнера, выполненного из немагнитного материала.

## 5. Формирование выходного сигнала модулятора

Модулятор представляет собой две пластины толщиной 50 мкм, шириной 2 мм, помещенные в воздушный зазор сердечника (рис. 5). На сердечниках расположены две обмотки: одна обмотка возбуждения с числом витков  $W_1$ , вторая обмотка выходная с числом витков  $W_2$ . В обмотку возбуждения подается синусоидальный ток, который создает поток возбуждения  $\Phi$ . Постоянный измеряемый поток, наведенный постоянным магнитом, равен  $\Phi_0$ .

В одном сердечнике модулятора (а) магнитный поток возбуждения и постоянный измеряемый поток складываются, во втором (б) вычитаются:

$$\Phi_a = \Phi + \Phi_0; \quad \Phi_b = -\Phi + \Phi_0. \quad (10)$$

В выходной обмотке индуцируется напряжение, равное

$$u_2 = \frac{d}{dt}(\Phi_a + \Phi_b)W_2. \quad (11)$$

С учетом (10), (11) запишется так

$$u_2 = \frac{d}{dt}2\Phi_0 W_2.$$

При насыщении сердечников модулятора потоком возбуждения  $\Phi_0 = \Phi_{0\min}$ , при токе в обмотке возбуждения модулятора, равном нулю,  $\Phi_0 = \Phi_{0\max}$ .

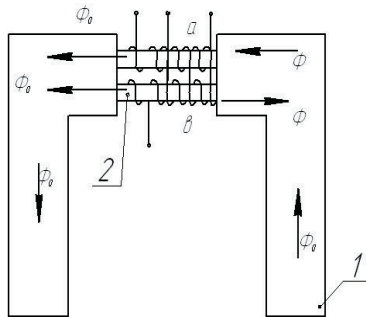


Рис. 5. К расчету выходного сигнала модулятора: 1 – сердечник датчика; 2 – сердечники модулятора

Функция  $\Phi(t)$  представляется рядом Фурье

$$\Phi(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t, \quad n=2, 4, 6, \dots \quad (12)$$

где

$$a_0 = \frac{4}{\pi}(\Phi_{\max} - \Phi_{\min})\theta + 2\Phi_{\min}, \quad a_n = \frac{4}{\pi n}(\Phi_{\max} - \Phi_{\min})\sin \theta,$$

$\theta$  – угол отсечки при кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания,  $\theta = \arcsin(H_m/H_s)$ ;  $H_s$  – напряженность насыщения;  $H_m$  – амплитуда возбуждения.

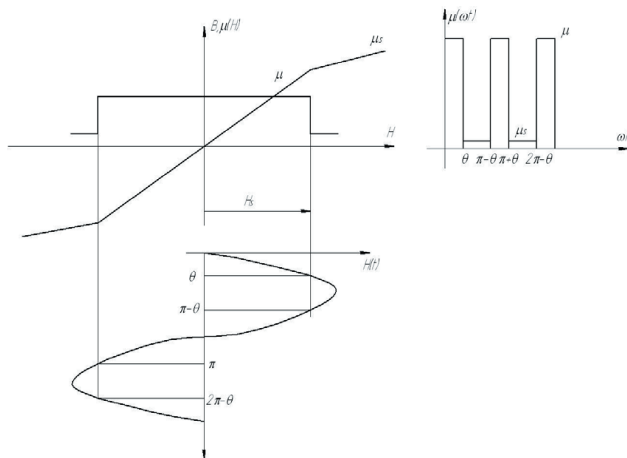


Рис. 6. К расчету выходного сигнала модулятора

Выходное напряжение второй гармоники будет равным

$$U_2(t) = W_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) \sin \theta \frac{4\omega}{\pi} \sin^2 \omega t. \quad (13)$$

После расчета потоков  $\Phi_{\max}$  и  $\Phi_{\min}$  определяется амплитуда выходного потока модулятора.

Магнитный поток в сердечниках модулятора может быть описан следующими зависимостями:

$$\Phi_a = \frac{S_m}{2}B(H + H_0); \quad \Phi_b = \frac{S_m}{2}B(H - H_0), \quad (14)$$

где  $S_m$  – площадь сердечника модулятора;

$H$  – напряженность поля возбуждения;

$H_0$  – напряженность измеряемого поля.

При  $H \gg H_0$  функции (14) раскладываются в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} \Phi_a &\approx \frac{S_m}{2}B(H + \frac{dB}{dH}H_0 + \dots); \\ \Phi_b &\approx \frac{S_m}{2}B(H - \frac{dB}{dH}H_0 + \dots). \end{aligned} \quad (15)$$

Суммарное значение потоков равно

$$\Phi_a(H) + \Phi_b(H) = S_m \frac{dB}{dH}H_0.$$

При артангенсной аппроксимации петли гистерезиса можно записать

$$\begin{aligned} B &= \frac{2B_s}{\pi} \arctg \sigma H, \\ \mu &= \frac{dB}{\mu_0 dH} = \frac{2B_s}{\mu_0 \pi} \frac{\sigma}{1 + \sigma^2 H^2}, \end{aligned}$$

$$\text{где } \sigma = \frac{\mu_0 \pi \mu_m}{2B_s};$$

$\mu_m$  – максимальное значение магнитной проницаемости.

Для синусоидального возбуждения можно записать

$$\Phi = \Phi_0 \eta \frac{1}{1 + \sigma^2 H_m^2 \sin^2 \omega t}, \quad (16)$$

где  $\eta$  – коэффициент ( $\eta < 1$ ), который учитывает рассеяние магнитного поля в зазоре сердечника, где расположен модулятор.

Выходное напряжение ферромодуляционного элемента определяется выражением

$$U_2 = W_2 \frac{d\Phi}{dt} = \Phi_0 \eta W_2 \frac{\omega \sigma^2 H_m^2 \sin^2 \omega t}{(1 + \sigma^2 H_m^2 \sin^2 \omega t)}. \quad (17)$$

Амплитуда второй гармоники равна

$$U_{m2} = \frac{4\omega \Phi_0 \eta W_2}{\sqrt{1 + \alpha}} \frac{2 + \alpha - 2\sqrt{1 + \alpha}}{\alpha},$$

$$\text{где } \alpha = \sigma^2 H_m^2.$$

## 6. Устройство обработки выходного сигнала модулятора

Блок-схема обработки выходного сигнала модулятора показана на рис. 7.

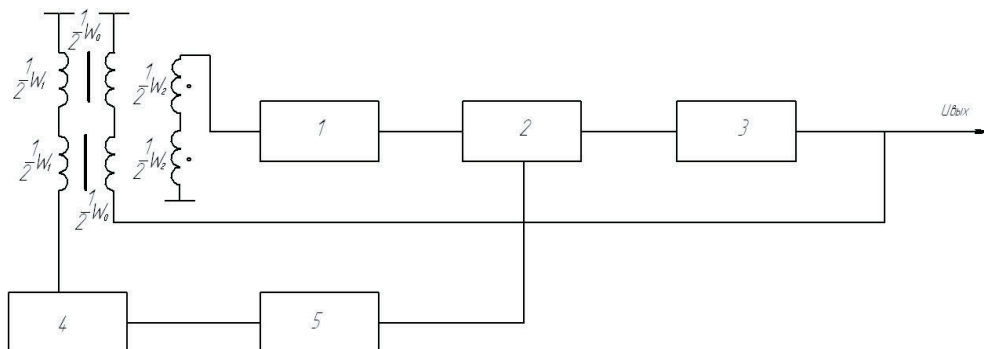


Рис. 7. Блок-схема обработки выходного сигнала модулятора: 1 — усилитель второй гармоники; 2 — синхронный детектор; 3 — УПТ; 4 — генератор; 5 — удвоитель частоты

С выходной обмотки  $W_2$  сигнал модулятора поступает на вход усилителя второй гармоники 1 с коэффициентом усиления  $K_1=100$ . Частота возбуждения модулятора 10 кГц. Ток возбуждения величиной 0,08 А с генератора 4 подается на обмотку возбуждения  $W_1$  и на удвоитель частоты 5. Напряжение с удвоителя частоты поступает на вход синхронного детектора 2, на второй вход синхронного детектора подается усиленный сигнал модулятора с усилителя 1. Коэффициент передачи синхронного детектора  $K_2=0,85$ . Для минимизации и стабилизации статической характеристики в устройстве обработки выходных сигналов модулятора введена отрицательная обратная связь через обмотку модулятора  $W_0$ . Коэффициент передачи отрицательной обратной связи равен

$$K_{oc} = \frac{W_0}{2l},$$

где  $W_0$  — число витков обмотки отрицательной обратной связи;

$2l$  — длина сердечников модулятора.

При числе витков обмотки обратной связи  $W_0=100$  и длине сердечников модулятора  $2l=10$  м коэффициент обратной отрицательной связи равен  $K_{oc}=10^4$ . Коэффициент передачи устройства обработки выходного сигнала модулятора определяется следующей зависимостью:

$$K = \frac{K_m K_1 K_2 K_3}{1 + K_m K_1 K_2 K_3 K_{oc}},$$

где  $K_m$  — коэффициент передачи модулятора по амплитудному значению второй гармоники,  $K_m=0,145 \cdot 10^{-2}$  Вм/А.

При коэффициенте усиления масштабирующего усилителя  $K_{10}=150$  коэффициент передачи устройства  $K=1,2 \cdot 10^{-2}$  Вм/А. Напряженность магнитного поля в сердечниках модулятора изменяется в пределах 0-200 А/м, таким образом максимальное значение сигнала датчика составляет 2,4 В.

## 7. Размещение постоянных магнитов и датчиков на корпусе контейнера

Размещение П-образных сердечников над плоскостью постоянных магнитов показано на рис. 8.

Датчик, схема которого второго показана на рис. 8 а, измеряет горизонтальные движения контейнера. На рис. 8 б

показан датчик, измеряющий вертикальные перемещения контейнера. В датчике, схема которого приведена на рис. 8 в, измеряется амплитуда колебаний и частота колебаний контейнера. Принцип работы датчика, показанного на рис. 8 в, иллюстрируется графиком его выходного сигнала, приведенного на рис. 9.

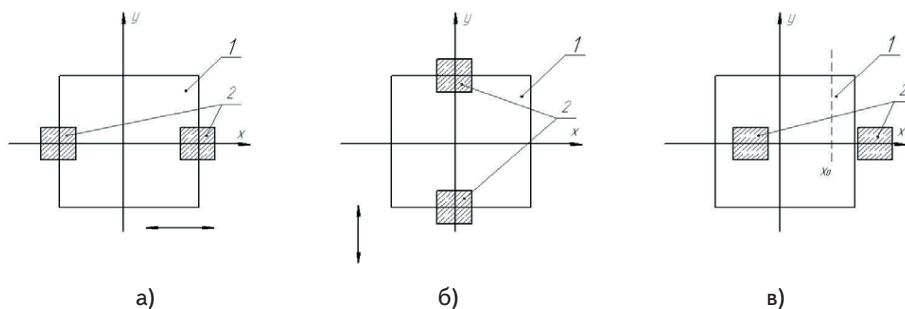


Рис. 8. Схема расположения постоянного магнита и магнитопровода датчика: 1 — постоянный магнит; 2 — полюса сердечника модулятора

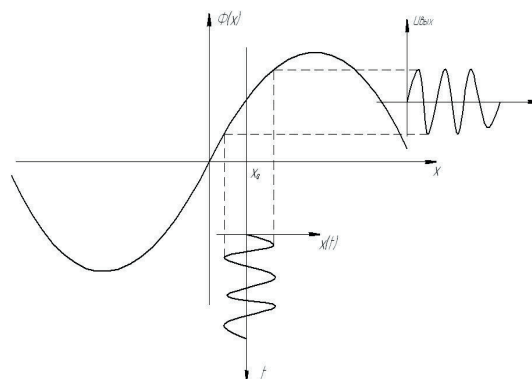


Рис. 9. Принцип работы датчика амплитуды и частоты колебаний контейнера

Постоянный магнит и центр магнитопровода датчика смещается относительно друг друга на величину  $x_0$ . Таким образом рабочая точка перемещается по характеристике на линейный участок и выходной



сигнал будет изменяться в смещенной точке на линейном участке характеристики. При изменении зазора между магнитопроводом и постоянным магнитом на выходе модулятора будет появляться сигнал, пропорциональный изменению воздушного зазора между плоскостью постоянного магнита и плоскостями сердечника датчика.

При сигнале датчика горизонтального положения  $u_x = U_{mx} \sin(\omega t + \Psi_x)$  и вертикального  $u_y = U_{my} \sin(\omega t + \Psi_y)$  происходит расчет смещения контейнера от точки равновесия

$$U_{cm} = \sqrt{U_{mx}^2 + U_{my}^2}$$

с учетом направления смещения.

*На основі аналізу стану транспортної техніки, що перебуває в експлуатації, показана необхідність розробки концепції відновлювального ремонту деталей транспортної техніки, що враховує тип сполучення й спосіб відновлення зношеної поверхні*

*Ключові слова: концепція, відновлювальний ремонт, газотермічне напылення, моделювання, оптимізація*

*На основе анализа состояния транспортной техники, находящейся в эксплуатации, показана необходимость разработки концепции восстановительного ремонта деталей транспортной техники, учитывающую тип сопряжения и способ восстановления изношенной поверхности*

*Ключевые слова – концепция, восстановительный ремонт, газотермическое напыление, моделирование, оптимизация*

*On base of the analysis of the condition of the transport technician, residing in usages, is shown need of the concept development of the reconstruction repair of the details of the transport technician, taking into account type of the interfacing and way of the reconstruction to worn-out surface*

*Key words - concept, reconstruction repair, gasothermal evaporation, modeling, optimization*

## Введение

Практика эксплуатации машин и оборудования подтверждает, что наиболее распространенной причиной их выхода из строя в 80 случаях из 100 является не

## 8. Выводы

Предложен метод контроля динамики движения контейнера при вибрационной обработке, основанный на применении группы магнитомодуляционных датчиков, расположенных у корпуса контейнера, позволяющий измерять вертикальное и горизонтальное перемещения контейнера, а также измерять амплитуду, частоту и ускорение движения контейнера.

## Литература

1. Букреев В.В., Яковенко В.В. Оптимальное проектирование железоотделителей на постоянных магнитах / В.В. Букреев, В.В. Яковенко // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. . – 2010. – Ч.2. – С. 13-15.

УДК 621.793.7

# АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПЦИИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

**С.А. Лузан**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра технологии машиностроения и ремонта машин  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
ул. Петровского, 25, г. Харьков, 61002  
Контактный тел.: 099-790-23-79; (057) 707-36-66  
E-mail: luzan1951@mail.ru

поломка, а износ и повреждение рабочих поверхностей [1, 2].

Развитие конструкций машин происходит при постоянном стремлении к увеличению их производительности, что почти всегда сопровождается по-